

# Les tremblements de terre en Valais : caractéristique de la sismicité et évaluation du danger

**Souad Sellami<sup>1</sup>**

Bull. Murithienne 126/2008 : 7-18 (2009)

L'article décrit les manifestations de l'activité sismique en Valais. Il traite de l'origine des tremblements de terre et de leur surveillance. Il compare la sismicité du Valais avec celle d'autres régions de Suisse. Enfin, il donne un aperçu sur la façon d'estimer le danger sismique et discute des limitations qui surviennent lors de l'évaluation de ce danger.

**Earthquakes in Valais: characteristic of the seismicity and hazard assessment.** – This paper describes the seismic activity in Valais. It exposes the cause and the survey of the earthquakes. The seismicity in Valais is compared to the one in other parts of Switzerland. It introduces the method to analyse the seismic hazard, and eventually discusses the problems and limitations which occur when evaluating this hazard.

**Die Erdbeben im Wallis: Charakteristik der seismischen Aktivität und Abschätzung der Gefährdung.** – Dieser Artikel beschreibt die Auswirkungen seismischer Aktivitäten auf das Wallis. Er behandelt die Ursachen, die Erdbeben zugrunde liegen, sowie deren Beobachtung. Die Seismizität im Wallis wird der anderer Regionen gegenübergestellt. Schliesslich wird ein Überblick über Verfahren zur Abschätzung der Erdbebengefahr gegeben sowie auf deren Beschränkungen eingegangen.

## **Mots clés**

sismicité, Valais, tremblements de terre, tectonique

## **Keywords**

seismic activity, Valais, earthquake, tectonic

## **Schlüsselwörter**

seismischer Aktivität, Wallis, Erdbeben, tektonik

\* Les mots suivis d'un astérisque renvoient au lexique en fin d'article.

<sup>1</sup> Service Suisse  
de Sismologie, EPFZ,  
Sonneggstr. 5,  
CH-8092 Zürich

## INTRODUCTION

En Valais, le danger sismique n'est pas négligeable. C'est la région de Suisse la plus sensible avec les Grisons et Bâle. La ville de Bâle a été en partie détruite en 1356 par un fort tremblement de terre qui a secoué une bonne partie de l'Europe centrale. Les tremblements de terre de 1855 à Viège et de 1946 à Sierre ont été ressentis bien au-delà des frontières. Localement ils ont provoqué également de nombreuses manifestations dans l'environnement comme des changements de sources thermales, des liquéfactions du sol etc. Ces effets, pour celui de Viège en 1855 sont reportés sur la (fig. 1). Déjà en 1857-1858, Otto Volger professeur de géologie à Zurich publiait une chronique en trois parties des tremblements de terre en Suisse (VOLGER 1857); la troisième partie longue de 522 pages traite des tremblements de terre en Valais !

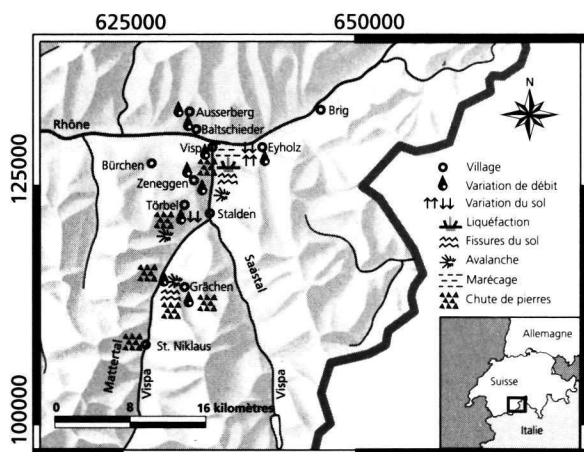


FIGURE 1 – Etendue des effets du tremblement de terre du 25 juillet 1855 dans la région de Viège. – (Adapté de FRITSCH 2007).

Les deux séismes les plus forts de ces dernières années en Suisse sont le séisme de Coire le 20 novembre 1991 et celui du col de Balme le 8 septembre 2005, qui ont été ressentis à une distance de 200 km environ. Depuis, il n'y pas eu d'événement notable à part de la sismicité induite dans la région de Bâle.

## Situation tectonique et causes des séismes

Les séismes résultent d'un état de contrainte du sous-sol. Lorsque l'augmentation de la contrainte dans la roche atteint le point de rupture, il y a cassure et cela génère

des ondes sismiques qui se propagent depuis la source dans toutes les directions jusqu'à la surface du sol. L'état de contrainte à grande échelle est dû à l'activité des plaques terrestres. A l'échelle locale, la rupture se fait au niveau de failles qui sont des zones de faiblesse ou de discontinuité dans la croûte terrestre.

Dans certains cas, des séismes peuvent être générés par des changements de contraintes locales dues à des causes anthropiques ou induites par l'activité humaine, comme des mines, barrages, tunnels, forages, etc. En Valais, il existe quelques cas de sismicité induite, par exemple celle liée au barrage de Salanfe. Lors de la mise en eau de ce barrage en 1963 et en 1996, de nombreux séismes ont eu lieu, dont certains ont été ressentis par la population. Des sources thermales sont apparues (BIANCHETTI & al. 1992, SELLAMI & al. 1997). Les ouvrages importants comme les barrages et les travaux d'excavation de tunnels sont équipés de stations de mesures sismiques pour la surveillance.

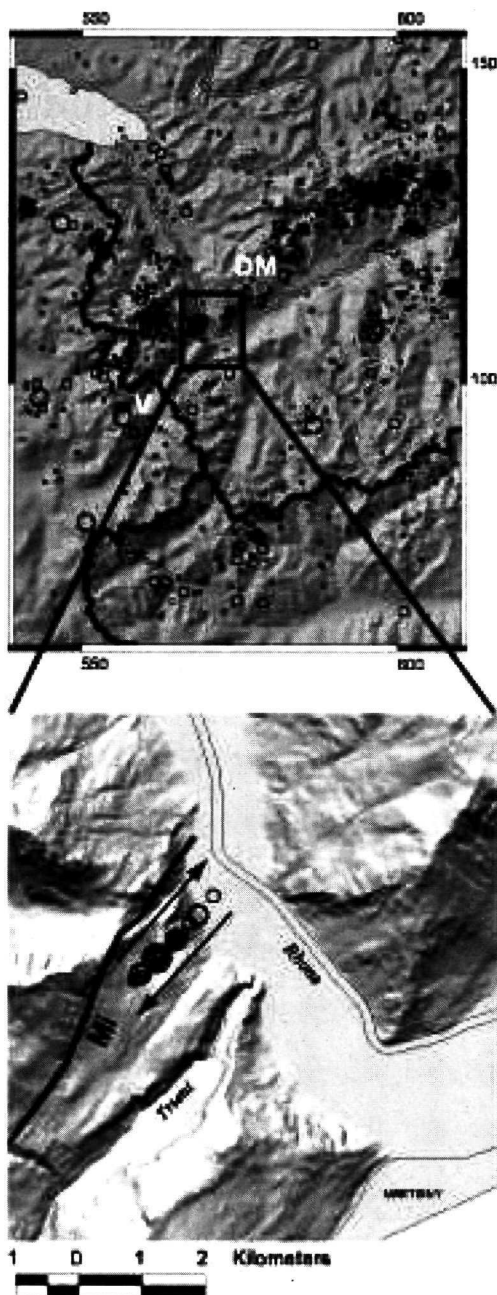
## Tectonique du Valais

Les zones les plus actives de l'Europe centrale sont la région alpine et le fossé rhénan (au nord de Bâle). Cette activité résulte de la genèse des Alpes engendrée par la collision des plaques africaine et européenne. La micro-plaque adriatique s'encastre dans la plaque européenne sous l'effet d'une poussée orientée vers le nord/nord-est et provoque un champ de contraintes radial, perpendiculaire à la chaîne alpine. La tectonique et la géologie du Valais ont été décrites et discutées dans de nombreuses publications spécialisées ou de vulgarisations. Nous signalons ici, l'ouvrage de Michel MARTHALER «Le Cervin est-il africain?» (2001) et celui de Marcel BURRI «Les Roches» (1994).

Du point de vue géologique, et très succinctement, la région valaisanne comprend deux unités géologiques principales : les nappes de l'Helvétique et les nappes du Pennique.

Le front helvétique, entre les Préalpes et le plateau molassique, et le front pennique, entre les Préalpes et les Alpes, sont des discontinuités qui délimitent des zones caractérisées par une sismicité distincte. C'est à dire que le nombre d'événements, leur mécanisme et leur profondeur diffèrent de part et d'autre de ces discontinuités.

En Valais, de nombreuses failles ont été étudiées par les géologues. Néanmoins, toutes les failles géologiques ne sont pas actives du point de vue sismique et celles qui engendrent les séismes, ne sont pas nécessairement reconnues, c'est à dire cartographiées. Dans les cas d'activité sismique importante, par exemple le long de la faille de San Andreas en Californie ou de la faille nord anatolienne en Turquie, la corrélation entre les séismes et les



failles géologiques est plus évidente. En Valais, la discontinuité du Rawil et la discontinuité du Simplon seraient respectivement les sièges des séismes de 1946 et 1855 (selon le Crealp<sup>2</sup>) mais une localisation précise des tremblements de terre n'était pas disponible à l'époque pour pouvoir le confirmer. Par contre, la sismicité récente (2000-2005) a permis de mettre en évidence un décrochement: la faille de Martigny (figure 2, DEICHMANN & al. 2002, DEICHMANN & BAER 2007).

### Enregistrement des séismes

Les instruments enregistrant et mesurant les séismes ont été développés depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Une station sismique actuelle est composée d'un appareil de mesure des mouvements du sol, d'une horloge synchrone et d'un système d'enregistrement ou de transmission digitale de l'information. Les mouvements du sol sont provoqués par l'arrivée des ondes sismiques et l'on mesure soit le déplacement, la vitesse ou l'accélération du sol.

Si les stations sismiques sont bien réparties, on peut déterminer plus exactement les caractéristiques d'un séisme, c'est à dire les coordonnées géographiques de l'épicentre\*, mais aussi la magnitude\* et la profondeur. De plus, l'observation détaillée des ondes en différentes stations de mesure permet, dans les cas favorables, de déduire de l'information sur la rupture de la faille qui a provoqué le séisme. On parle de mécanisme au foyer.

Ces dernières années, l'enregistrement des tremblements de terre s'est considérablement amélioré. Non seulement la sensibilité et la précision des sismomètres ont augmenté, ce qui permet d'enregistrer dans une gamme de fréquences et une dynamique du signal plus étendues, mais parallèlement le réseau de surveillance s'est densifié au cours du temps, ce qui permet de localiser plus précisément la source des tremblements de terre.

### Réseau sismique

Le premier appareil d'enregistrement en Suisse (Zürich en 1911) était un «Mainka» du nom de son concepteur,

FIGURE 2 – Epicentres des séismes enregistrés par le Service Sismologique Suisse entre 1999 et 2005, dans la région de Martigny. En bas, l'alignement des epicentres de la série de séismes de Martigny de 2001. Les flèches indiquent le sens de la réactivation de la fracture (DEICHMANN & BAER 2007).

FIGURE 3 – Photographie du sismographe portable conçu par Alfred de Quervain et Auguste Picard en 1924 (propriété des archives d'images de la bibliothèque de l'école polytechnique de Zürich).

### NOTE

<sup>2</sup> Centre de recherche sur l'environnement alpin.

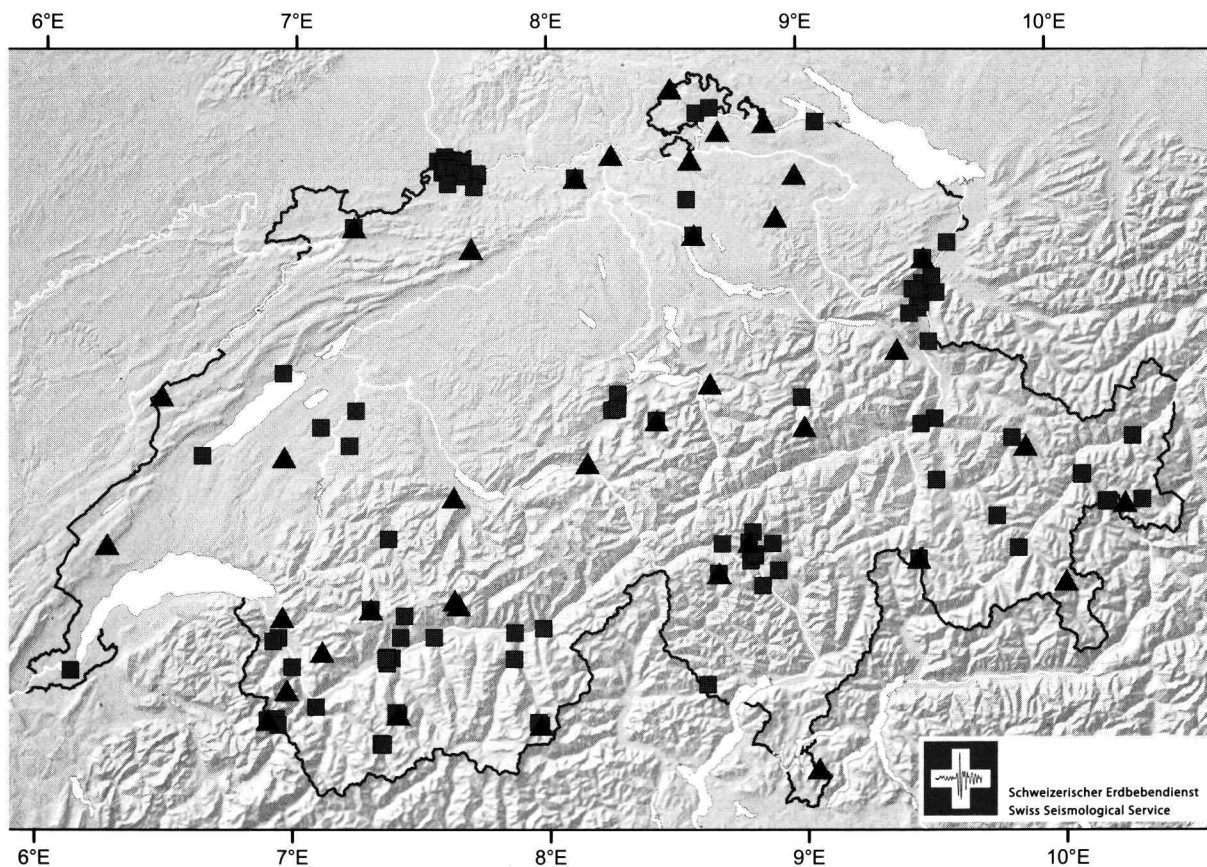
un savant allemand. Par la suite les suisses Picard et de Quervain ont développé un sismographe, selon le principe du pendule, mais très volumineux. Des prototypes ont été en fonction à Zurich, Neuchâtel, Bâle et Coire. Celui de Zurich pesait près de 21 tonnes. Une version transportable avait été développée pour l'enregistrement des répliques (fig. 3). Elle a pu enregistrer en particulier l'événement du 21 avril 1924 qui a suivi le tremblement de terre de Brigue du 15 avril 1924, ressenti dans toute la Suisse. En 1932 un autre appareil a été installé à Sion, dans la cave de l'évêché, il y est resté jusqu'en 1941 pour être ensuite installé au collège de Brigue jusqu'en 1952. Jusqu'au milieu des années soixante il y avait donc quatre stations permanentes en Suisse. A partir de cette date, le réseau s'est développé. La première station moderne en Valais a été installée au barrage de la Grande Dixence en 1970. La figure 4 montre la distribution actuelle des stations sismiques en Suisse. Il y en a actuellement plus d'une

trentaine gérées par le Service Sismologique Suisse\* (connu sous l'abréviation «SED», venant de l'allemand «Schweizerischer Erdbebendienst») qui est basé à l'EPFZ. Les triangles correspondent aux stations qui font partie du réseau sismique de surveillance nationale du SED, elles enregistrent des vitesses. Les carrés correspondent à des stations installées en champ libre ou sur un bâti pour enregistrer plus particulièrement les séismes locaux. Ces dernières mesurent l'accélération du sol ou des mouvements des structures sur lesquelles elles sont installées. Ces accéléromètres\* capables d'enregistrer des mouvements plus forts sans être saturés sont placés sur les barrages et sur des sites qui font l'objet d'une surveillance particulière, temporaire ou pas. Par exemple, les stations de Leukerbad ont été installées pour la surveillance des travaux du tunnel du Lötschberg.

### Situation sismotectonique

Le réseau du SED est actuellement très performant. L'enregistrement de la sismicité récente est de très bonne qualité. De nombreuses stations enregistrent des séismes même très faibles bien en deçà du seuil de perception par

FIGURE 4 – Stations sismiques du SED en 2009. Les triangles sont les stations du réseau de surveillance, les carrés sont les accéléromètres pour une surveillance locale, plus ou moins temporaire.



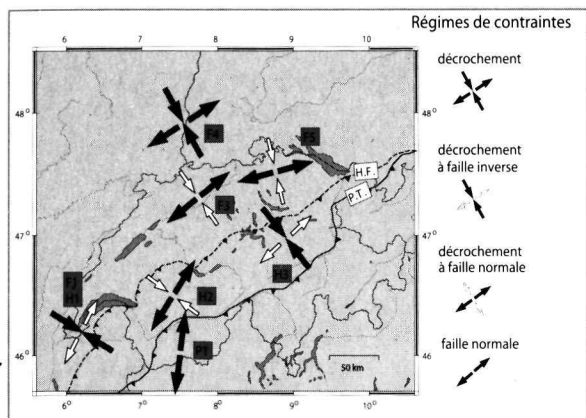
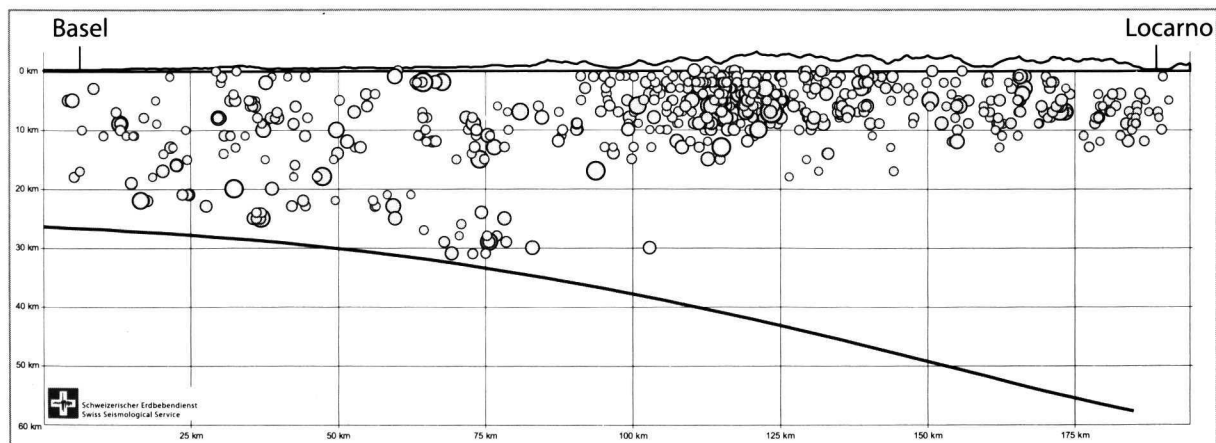


FIGURE 5 – Directions des axes de contraintes déduits de l'analyse de séismes. Les différentes régions de provenance des séismes sont indiquées avec des grisés différents. H.F = front helvétique, P.T = front pennique (adapté de KASTRUP & al. 2004).

la population. Ces petits séismes ont leur utilité car leur étude procure de l'information sur l'orientation des contraintes tectoniques et sur les mécanismes en jeux sur la faille, à la source du séisme, soit en d'autres termes, la cause et la géométrie de la rupture.

Grâce à de bonnes qualités d'enregistrement depuis 1976, l'étude détaillée des séismes récents a montré que le style de faille et l'orientation des contraintes varient considérablement du nord au sud et le long de l'arc alpin (KASTRUP & al. 2004). Dans le Nord de la Suisse des décrochements associés à une faille normale prédominent tandis que des chevauchements (ou failles inverses) peu profonds sont généralement observés le long du front helvétique. Les domaines penniques du Valais et des Grisons

FIGURE 6 – Profondeur des séismes de magnitude supérieure à  $M=2.5$  (entre 1975 et 2007) le long d'un profil Nord-Sud dans les Alpes. La base de la croûte est indiquée. DEICHMANN & al. 2002.



sont caractérisés par des failles normales avec des axes d'extension perpendiculaires à l'arc alpin (fig. 5).

Les profondeurs des séismes enregistrés dépassent rarement 10 km sous les Alpes tandis qu'elles atteignent 30 km sous le plateau molassique et le Jura (fig. 6). Ces observations sont essentielles pour différencier des zones de sismicité homogène en vue de l'analyse du danger sismique, car pour une même magnitude, plus un tremblement de terre est superficiel plus il est ressenti.

### Sismicité historique et intensité

L'évaluation du danger sismique se base sur la sismicité passée. Les séismes sont enregistrés par des instruments de mesure depuis moins de 100 ans, il s'agit de la période instrumentale. Dans une région de sismicité modérée comme la Suisse, il s'agit d'un laps de temps bien trop court pour pouvoir capter l'activité sismique. En effet, le phénomène géologique à la base de la sismicité est un phénomène qui se passe à l'échelle de siècles, voire de millénaires. Il faut donc pour cela accéder, dans la mesure du possible, à l'information antérieures soit pré-instrumentale dans laquelle on distingue les périodes historique, archéohistorique et paléosismique.

La période historique correspond à l'époque où le recueil de l'information se fait sur la base de documents historiques qui mentionnent l'occurrence d'un tremblement de terre et décrivent les dommages éventuels. Ce sont des témoignages d'époque obtenus par le biais de correspondances privées, de journaux, de registres paroissiaux, etc.

Dans le cas du séisme de 1855 survenu à Viège, FRITSCHÉ & al. (2006) a utilisé les documents suivants: la lettre du Père P. J. Studer, de Visperterminen, à l'évêque de Sion datée du 1<sup>er</sup> août 1855 (Archives épiscopales Sion. T. 067 No. 030) qui décrit en détail les dommages subit par son église, et la lettre adressée par le major



Louis Closuit à son épouse le 30 juillet 1855 (Archives de l'Etat du Valais) mentionnant qu'il doit dû quitter le domicile pour se réfugier sous des tentes ou encore les comptes-rendus des séances du Conseil d'Etat 1855–57 qui envisageait d'interdire dans la plaine du Rhône des constructions futures.

Ces observations de tremblements de terre anciens sont surtout descriptives et plus ou moins précises. C'est à dire que l'on sait qu'un tremblement de terre a été ressenti à un endroit donné et, dans le meilleur des cas, cette information est accompagnée par une description des effets du séisme. Si un tremblement de terre a été ressenti simultanément en plusieurs lieux, il devient possible de le localiser approximativement. Si tel n'est pas le cas, il est simplement indiqué à l'endroit où il a été ressenti.

De même, à défaut d'un enregistrement de la magnitude du séisme, il est possible d'estimer son intensité\*. L'intensité est une mesure indirecte de la force d'un séisme qui se base sur les effets de ce séisme, soit la façon dont il a été ressenti et les dommages engendrés.

Il a fallu pour cela concevoir des échelles d'intensité. La plus connue étant celle de Mercalli. Une des premières échelles d'intensité est celle de Rossi-Forel, elle a été utilisée en Suisse jusqu'en 1970. Soit presque 100 ans, car c'est vers 1880 que le vaudois François-Auguste Forel avec son collègue italien, le conte de Rossi, l'ont publiée. L'échelle d'intensité a été adaptée et a évolué en fonction du type de construction et de l'urbanisme environnant. Le **tableau 1** contient un extrait simplifié de l'échelle EMS98 qui est actuellement utilisée en Europe. Les valeurs d'intensité se notent, en général, en chiffres romains.

Les séismes en Suisse depuis l'an 1000 jusqu'en 2007 sont représentés à la **figure 7**. On y distingue les séismes historiques notés d'après leur intensité et les séismes de la période instrumentale récente (depuis 1976) dont la magnitude est indiquée.

#### Relation de Gutenberg-Richter

Le nombre de séismes à l'échelle mondiale suit une relation caractéristique linéaire entre le logarithme du nombre cumulé de séismes par an (ou autre intervalle de temps) et les magnitudes. C'est la relation de Gutenberg-Richter, dont la formulation principale est :

$$\log(N) = a - b.M$$

M est la magnitude; N est le nombre d'événements d'une magnitude plus grande que M par unité de temps et de surface; a et b sont des paramètres caractérisant l'activité sismique de la zone comme suit. La valeur a donne la quantité globale de séismes et la valeur b, pente de la droite, indique la prépondérance des séismes forts (si  $b < 1$ ) ou des faibles (si  $b > 1$ ) dans la zone étudiée. A l'échelle du globe et pour de larges régions, la valeur de b est égale à 1.

Cette relation est linéaire uniquement dans un intervalle de magnitude où le catalogue des séismes est complet.

La sismicité encore plus ancienne des époques «archéohistorique» et «paléosismique» est révélée respectivement à partir de destructions relevées sur des sites archéologiques, en Suisse notamment sur le site de Augusta-Raurica près de Bâle et sur des indications paléo-géologiques comme des traces de failles (toujours près de Bâle) ou à partir de corrélations sur les mouvements de sédiments lacustres (comme dans le lac des Quatres-Cantons) ou encore de destructions de stalagmites/stalactites dans des grottes. Les résultats de ces études sont résumés dans une livre sur la sismicité historique en Suisse «Nachbeben» (GISLER & al. 2008).

#### Catalogue de tremblements de terre

L'évaluation du danger sismique commence par l'élaboration préalable d'un catalogue de tremblements de terre. Un catalogue\* est une base de donnée détaillée de tous les événements sismiques enregistrés pour une région donnée. On y note la date, le lieu, la magnitude et des informations complémentaires si possible.

Il faut, non seulement, avoir l'information la plus complète possible mais pouvoir juger de la qualité de l'information pour pouvoir l'utiliser. Le mieux est d'avoir des catalogues qui remontent le plus loin possible dans le temps et de connaître pour chaque période le seuil de détection. Ce seuil est le niveau de complétude\* (en anglais completeness\*) du catalogue.

Pour ce faire, les scientifiques procèdent de deux manières différentes : tout d'abord en estimant la qualité des sources d'information, puis par une analyse graphique et statistique des tremblements de terre.

L'analyse des données suisse est indiquée sur les **tableaux 2 et 3**; on peut y voir les circonstances à l'origine des ressources historiques en Suisse et le seuil de complétude des tremblements de terre.

Par exemple, le **tableau 3** indique la valeur 5 pour la région Bâle-Zurich en 1680. Cela signifie que les spécialistes considèrent que depuis l'an 1680, tous les tremblements de terre de magnitude supérieure ou égale à 5 ont été enregistrés (ou catalogués) dans cette région. Cette valeur (5) correspond à un seuil de détection garanti.

En ce qui concerne le Valais, le catalogue n'est complet que pour des dates plus tardives relativement au reste de la Suisse, le Tessin mis à part; prenons par exemple la magnitude 5, elle n'est assurée qu'à partir de 1850.

Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle (soit dès l'installation des premières stations sismiques) ce sont les événements les plus forts qui manquent (absents du catalogue), car l'intervalle de temps que recouvre la sismicité instrumentale (environ une centaine d'années) est encore trop court par rapport à la périodicité des grands événements. Or en Valais, les séismes d'une magnitude supérieure ou

INTENSITÉ EMS	DÉFINITION	DESCRIPTION RÉSUMÉE DES EFFETS TYPIQUES OBSERVÉS
I	Non ressenti	Non ressenti.
II	Rarement ressenti	Ressenti uniquement par quelques personnes au repos dans les maisons.
III	Faible	Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une vibration ou un léger tremblement.
IV	Largement observé	Ressenti à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes, à l'extérieur par très peu. Quelques personnes sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent.
V	Fort	Ressenti à l'intérieur des habitations par la plupart, à l'extérieur par quelques personnes. De nombreux dormeurs se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans leur ensemble. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Chute d'objets. De nombreuses maisons subissent des dégâts non structuraux comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre.
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étagères. De nombreuses maisons ordinaires bien construites subissent des dégâts modérés : petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées : des bâtiments plus anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la défaillance des cloisons de remplissage.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des défaillances sérieuses des murs, tandis que des structures anciennes peu solides peu vent s'écrouler.
IX	Destructions	Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écroulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants : défaillances sérieuses des murs et effondrement structural partiel.
X	Destructions importantes	De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent, même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits.
XII	Catastrophe généralisée	Pratiquement tous les bâtiments sont détruits.



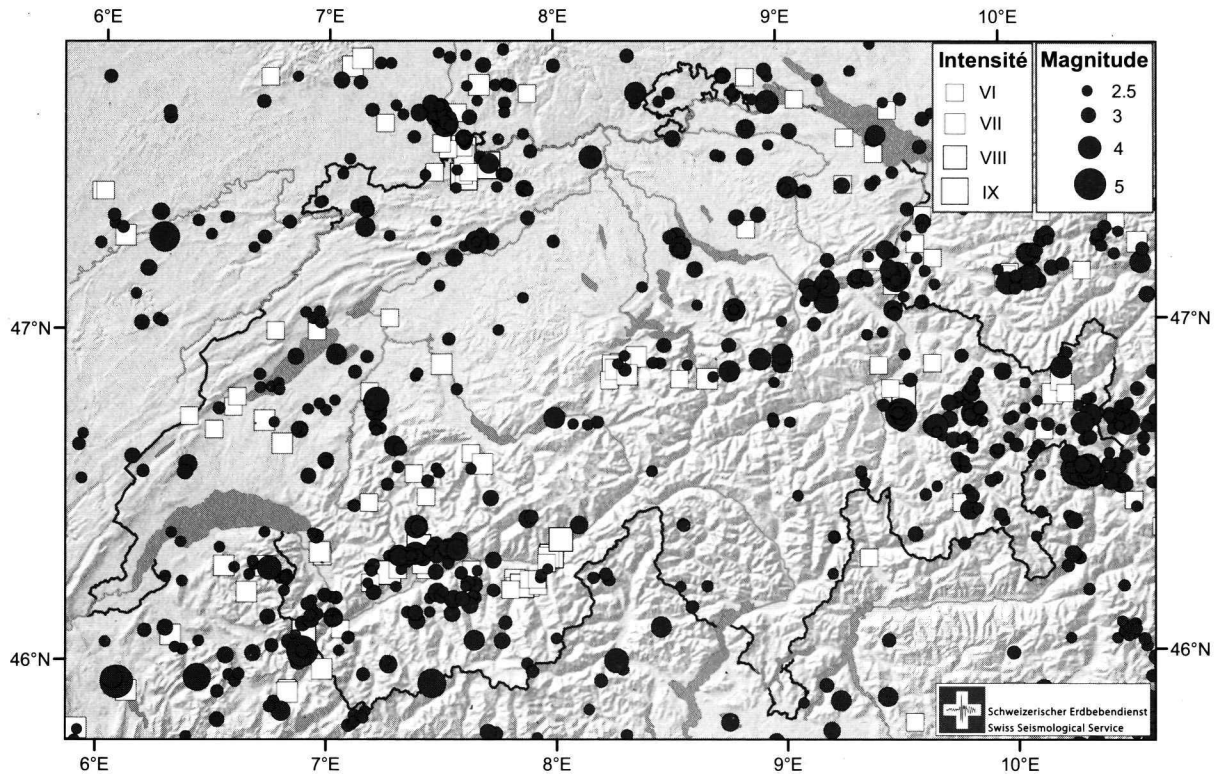


FIGURE 7 – Carte des séismes récents (1975-2007) de magnitude supérieure à 2.5 superposés aux séismes anciens, depuis l'an 1000 jusqu'en 1974, d'intensité (selon l'échelle EMS98) supérieure à VI (SED).

égale à 5.5, ont une récurrence d'une centaine d'années environ, alors que dans les autres régions de Suisse, ces événements sont moins fréquents. Les **figures 8a** et **8b** nous montrent les événements enregistrés en fonction de leur magnitude et du temps, dans la zone valaisanne étendue au Chablais (**fig. 8a**) ainsi que pour la région Zürich-Bâle avec une partie du fossé rhénan (**fig. 8b**). On remarque que la zone incluant Zurich et Bâle bénéficie d'un enregistrement de la sismicité beaucoup plus précoce. En effet, il n'y a pas d'enregistrement en Valais avant l'an 1500. Il est intéressant de relever que pour les faibles magnitudes, le nombre d'événements enregistrés augmente significativement avec le temps dans toutes les régions, grâce au développement du réseau sismique.

Le seuil de détection des séismes de faible magnitude (les plus fréquents) dépend principalement de la proximité de l'enregistrement et donc de la couverture instrumentale de la région. En Suisse, le réseau sismique est dense, et le seuil pour lequel les magnitudes sont complètes – depuis 1980 environ – correspond à une magnitude de 2.5, bien que de nombreux séismes plus faibles (de magnitude de l'ordre 1) soient parfois enregistrés.

### Méthode d'évaluation du danger sismique

Le service sismologique suisse a publié en 2004 une nouvelle carte du danger sismique en Suisse (GIARDINI & *al.* 2004). Elle fait partie d'une série de cartes d'aléa sismique\*. L'aléa est une estimation du danger qui tient compte de la probabilité d'occurrence du phénomène «dangereux». On ne doit pas le confondre avec le risque, qui prend en considération la vulnérabilité et les pertes humaine et matérielles potentielles.

Pour déterminer l'aléa sismique, il faut pouvoir déterminer avec le plus de précision possible où se sont produits les tremblements de terre passés, quelle a été leur force et leur fréquence. C'est pourquoi l'étude du catalogue des tremblements de terre est si importante. Une hypothèse de travail capitale suppose que le processus soit stationnaire, et donc que la survenue des séismes dans le futur intervienne avec la même fréquence que dans le passé. Cette hypothèse permet d'utiliser un modèle probabiliste de Poisson. La méthode probabiliste s'appuie sur trois points :

- La définition des sources sismiques actives pour une région donnée.

Ce sont des zones caractérisées par leur sismicité. La sismicité d'une région est caractérisée tout d'abord par la fréquence des événements et leur taille mais également par leur mécanisme c'est à dire l'orientation des contraintes et la géométrie de la rupture qui



les induisent. Ces zones sources peuvent être des failles ou des régions plus ou moins étendues présentant une sismicité homogène. La délimitation de ces zones (fig. 9) repose sur différents critères, principalement la distribution géographique et quantitative des événements. Ces observations sont complétées, dans la mesure du possible, par la combinaison de diverses informations géologiques.

- L'activité des sources.  
Une fois les sources délimitées, il faut connaître l'activité de la source. L'activité d'une source est caractérisée par la récurrence des tremblements de terre de chaque magnitude et par la magnitude maximale possible. Cette activité est quantifiée au travers de la relation de Gutenberg-Richter.

La figure 10 illustre la relation de Gutenberg-Richter appliquée à deux zones suisses qui ont des activités sismiques différentes. La zone «Région 1» (les losanges) est un modèle applicable à une partie du Valais qui présente une forte activité avec relativement beaucoup de forts séismes (en moyenne une magnitude au dessus de 5.5 tous les 100 ans). La «Région 2» (les carrés) un modèle de zone dans le nord-est de la Suisse qui montre une activité sismique faible, avec en moyenne qu'un événement de magnitude 4.5 ou plus tous les 100 ans.

L'atténuation du mouvement du sol.

- Une fois les sources délimitées et caractérisées, il faut estimer l'effet (le mouvement du sol) au site étudié, résultant d'un séisme provenant de ces sources. Ce mouvement du sol, en général l'accélération, diminue avec l'éloignement du séisme et dépend des propriétés de propagation entre le foyer et le site. Pour cela on décrit à l'aide d'un modèle mathématique, l'atténuation de ce mouvement du sol. Cette atténuation est fonction de la source du séisme, de la distance au site et de conditions locales.

#### Cartes d'aléa sismique probabiliste et carte de zonage sismique

L'évaluation de l'aléa donne la valeur probable du mouvement du sol (par exemple l'accélération) atteinte pendant une période de temps donnée qu'on appelle la période de retour\* («return period»). Cette période de retour que l'on peut comprendre comme la période de récurrence d'un événement sismique, est liée au temps d'exposition (en anglais on utilise le terme de «exposure time») correspond au temps pendant lequel la structure à protéger est soumise au risque. C'est à dire que pour évaluer le niveau de danger sismique auquel doit résister un

#### ANNÉE ÉVÉNEMENTS IMPORTANTS

563	Eboulement au Grammont peut-être à la suite d'un tremblement de terre
IX <sup>e</sup> s.	Premières mentions de tremblements de terre (ressentis en Suisse) dans des annales.
1356	Gros tremblement de terre à Bâle relativement bien documenté
1755	Tremblement de terre de Lisbonne qui a rendu les scientifiques en Europe plus attentifs
1856	Premier catalogue en Suisse, travaux de G.H.O Volger
1878	Création de la commission tremblements de terre à Berne qui a pour but la surveillance et le catalogage des tremblements de terre
1879	Premier bulletin annuel de la commission de tremblement de terre.
1880	Présentation à Brigue par F.-A. Forel de l'échelle d'intensité Rossi-Forel utilisée en Suisse jusqu'en 1970
1904	La Suisse adhère à l'association internationale de sismologie
1911	Installation de la première station d'enregistrement sismique à Zurich puis Neuchâtel, Coire et Bâle
1932	Station supplémentaire installée à Sion puis déplacement à Brigue (1941-1952)
1963	Suspension du «Jahresbericht» de SED jusqu'en 1971
1975	Installation du réseau sismique analogique
1990	Mise en place d'accéléromètre sur des sites sensibles
2000	Renouvellement des stations sismiques et installation de nouvelles à large spectre

TABLEAU 2 – Dates historiques importantes pour le suivi scientifique des séismes en Suisse. Ces événements ont une influence sur le seuil de détection systématique des tremblements de terre.

MAGNITUDE	BÂLE ET ZÜRICH	VALAIS	CH
6	1300	1600	1600
5.5	1300	1750	1750
5	1680	1850	1850
4.5	1800	1878	1878
4	1878	1878	1878
3	1964	1976	1976
2.5	1976	1986	1986

TABLEAU 3 – Dates et magnitudes pour lesquelles le catalogue suisse (CH) est complet; comparaison avec les catalogues régionaux de la région Bâle-Zürich avec le Valais et la Suisse. Les dates correspondent à un seuil de détection garanti.

bâtiment pendant 50 ans (sa durée de vie moyenne) il faut considérer les tremblements de terre dommageables pendant une durée de 475 ans environ. La relation entre le temps d'exposition et la période de retour dépend du modèle de probabilité appliqué.

Pour les sites sensibles (barrages, centrales énergétiques), on doit envisager l'effet d'événements moins probables ou, autrement dit, qui ont des périodes de récurrence plus longues. Cela revient, au niveau des paramètres de calcul, à estimer des «durées de vie» plus longues.

Ces résultats d'aléa sont valides pour une classe de sol particulier. Le plus souvent elle correspond au soubassement rocheux. Il faut les adapter aux autres types de sol que l'on rencontre. Les cartes d'aléa servent de base à l'établissement des cartes de zonage qui délimitent les

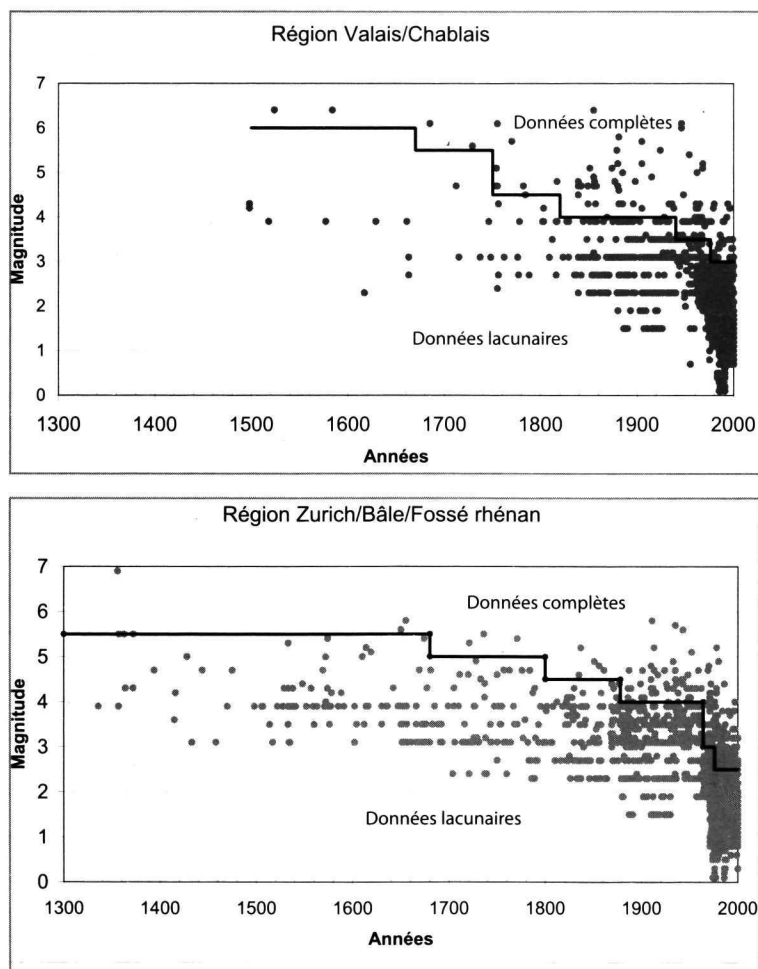
régions où s'appliquent des règles de construction parasismique différentes. La **figure 11** est la carte de zonage qui indique pour la Suisse les normes de construction SIA 261 (WENK & LESTUZZI, 2003). On voit que le Valais, inscrit en zones Z3a z Z3b, présente les normes de constructions les plus contraignantes.

### Evaluation de l'incertitude

Une difficulté majeure dans les calculs de géophysique, et dans l'élaboration de cartes d'aléa en particulier, est l'évaluation de l'incertitude des résultats. Elle provient de l'incertitude systémique qui découle de la nature aléatoire des phénomènes géophysiques mais aussi de celle qui résulte d'une connaissance incomplète des données

utilisées (incertitude dite épistémique). En effet, les connaissances sur les séismes anciens, la géologie profonde, les mouvements locaux du sol ne sont pas entièrement maîtrisés. Cette incertitude épistémique peut être prise en compte en considérant plusieurs modèles plausibles. Ces modèles possibles sont pondérés et combinés pour former des arbres logiques (ou arbre de décision). Il en résulte plusieurs options de poids différent, chaque branche ayant une certaine probabilité. La carte principale correspond à un modèle préférentiel.

Il apparaît que par rapport aux autres régions de Suisse, le Valais est une zone où l'incertitude est une des plus importantes. D'une part l'incertitude épistémique est élevée et d'autre part, l'incerti-



FIGURES 8a et 8b – Comparaison de la différence de complétude de deux catalogues différents, illustrée par la distribution des magnitudes des tremblements de terre en fonction du temps pour deux régions différentes (a : Valais et b : région Zürich/Bâle). La ligne délimite sur le graphe la région (période/magnitude) de connaissances incomplètes (en dessous).

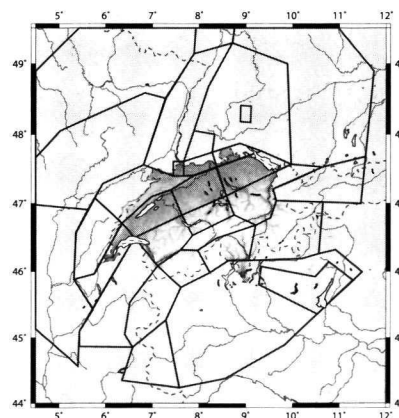


FIGURE 9 – Exemple de délimitation de zones pour l'analyse de la sismicité (MUSSON, SELLAMI & BRUSTLE 2009).

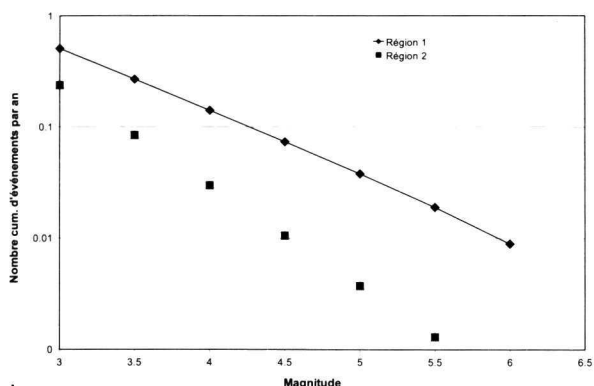


FIGURE 10 – Graphe de la relation de Gutenberg-Richter illustrant l'activité sismique de deux zones différentes.

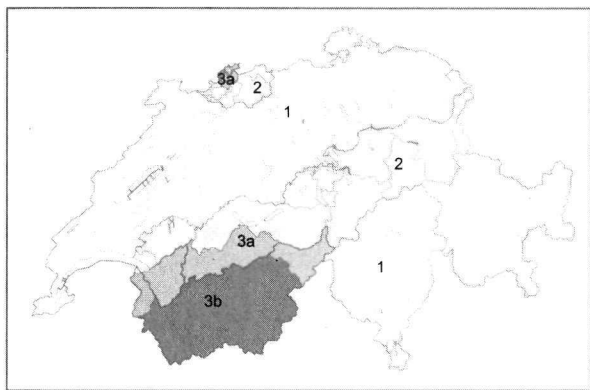


FIGURE 11 – Carte des zones avec les normes SIA de construction parasismiques en Suisse. (SIA 261). Zone 1 : pas de recommandation particulière -> Zone 3b: normes parasismiques les plus contraignantes (WENK & LESTUZZI 2003).

tude systémique est proportionnelle à la valeur de l'aléa qui est élevée en Valais. Cette incertitude pourrait être néanmoins réduite par une meilleure connaissance des paramètres de base.

## CONCLUSION

La sismicité du Valais diffère des autres régions de Suisse par son activité: les séismes conséquents y sont plus fréquents, tous les 100 ans environ. Depuis l'an 1000, sur 28 séismes de magnitude supérieure à 5.5 en Suisse et dans les régions limitrophes, la moitié se situe en Valais ou à la limite du canton.

Nous avons constaté que les mécanismes qui induisent les séismes diffèrent du nord au sud (Jura, plateau molassique et unités alpines) mais aussi le long des unités alpines d'est en ouest. De part et d'autre du front penninien en Valais, le mécanisme des tremblements de terre varie également.

L'enregistrement de façon précise des séismes même très faibles permet d'établir les liens avec la situation tectonique locale, pour comprendre le mécanisme de ces séismes. Un nouveau travail de thèse sur ce thème a été entrepris à l'école polytechnique fédérale de Zurich en 2008.

Les foyers des tremblements de terre en Valais sont en général moins profonds que dans d'autres régions du nord de la Suisse. A magnitude égale, plus le tremblement de terre est superficiel, plus fort il est ressenti.

Le Valais est la région de Suisse avec l'aléa sismique le plus sérieux. Les résultats de l'aléa reflètent l'état des connaissances actuelles et sont périodiquement mis à jour par le service sismologique suisse. Il apparaît que l'incertitude attachée à l'élaboration des cartes du danger sismique en Valais reste importante. L'amélioration du catalogue historique contribuerait déjà à réduire cette incertitude et à améliorer l'estimation du danger sismique. Parallèlement, diverses recherches du Crealp, et du SED sont en cours pour mieux comprendre les mouvements tectoniques à l'origine des tremblements de terre dans la région. C'est en particulier le thème principal du projet COGEAR (COupled seismogenic GEohazard in Alpine Regions) qui est une étude interdisciplinaire du danger sismique.

Une fois le danger d'occurrence des tremblements de terre observé, il faut tenter de diminuer le risque sismique. Une approche est pour cela d'étudier les effets de site, c'est à dire analyser en un endroit particulier la réaction du sous-sol aux ondes sismiques, et prévoir si ce sol est susceptible d'amplifier localement les mouvements.

Des études dans ce domaine, en particulier dans la vallée du Rhône, ont déjà été entreprises (WAGNER 2000, ROTEN & FÄH 2007) et d'autres sont en cours (Crealp, Ofev<sup>3</sup>).

Les résultats de ces études permettront d'adapter à cet endroit le type de constructions et plus généralement l'urbanisme. Enfin, notons que les cartes d'aléa servent de base à l'établissement des normes de construction parasismique qui induisent localement les prescriptions en matière de construction. Le canton du Valais est le canton qui applique le plus systématiquement ces normes de constructions parasismiques.

## REMERCIEMENTS

Le travail présenté ici a été effectué au service sismologique de l'école polytechnique de Zurich. Merci à Sabine Wohlbiel pour les figures du SED, et à Nicolas Deichmann pour la relecture de l'article.

## NOTE

<sup>3</sup> Office fédéral de l'environnement.

## BIBLIOGRAPHIE

- BIANCHETTI, G., P. ROTH, F.-D. VUATTAZ & J. VERGAIN 1992. Circulations profondes en milieu alpin : Relations entre infiltration, sismicité induite et sources thermales. Le cas de Val d'Illiez, Valais, Suisse. *Eclogae geol. Helv.* 85/2 : 291-305.
- BURRI, M. 1994. *Les Roches*. Coll. Connaître la nature en Valais. Editions Pillet, Martigny, 159 pp.
- DEICHMANN, N. & M. BAER 2007. Earthquakes in Switzerland and surrounding regions 1996-2007: <http://histserver.ethz.ch/seismotectonics/reports.php>
- DEICHMANN, N., M. BAER, J. BRAUNMILLER, D. BALLARIN DOLFIN, F. BAY, F. BERNARDI, D. DELOUIS, D. FÄH, M. GERSTENBERGER, D. GIARDINI, S. HUBER, U. KRADOLFER, S. MARAINI, I. OPRSA, R. SCHIBLER, T. SCHLER, S. SELLAMI, S. STEIMEN, S. WIEMER, J. WÖSSNER & A. WYSS 2002. Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2001. *Eclogae Geol. Helv.* 95/2: 249-261.
- FÄH, D. & al. 2003. Earthquake Catalogue Of Switzerland (ECOS) and the related macroseismic database. *Eclogae geol. Helv. - Swiss Journal of Geosciences* 96: 219-236.
- FRITSCHÉ, S., D. FÄH, M. GISLER & D. GIARDINI 2006. Reconstructing the damage field of the 1855 earthquake in Switzerland: historical investigations on a well-documented event. *Geophys. J. Int.* 166. pp 719-731.
- GIARDINI, D., S. WIEMER, D. FÄH & N. DEICHMANN 2004. *Seismic Hazard Assessment of Switzerland*. Rapport du SED. 95 p.
- GISLER, M., D. FÄH & D. GIARDINI 2008 (Eds). *Nachbeben. Eine geschichte der Erdbeben in der Schweiz*. Edition Haut, Berne, 187 p.
- GRÜNTAL, G. (Dir.) 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, vol. 15, Conseil de l'Europe, Luxembourg.
- KASTRUP, U., M.L. ZOBACH, N. DEICHMANN, K. EVANS, A.J. MICHAEL & D. GIARDINI 2004. Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine Foreland derived from inversion of fault plane solutions. *J. Geophys. Res.* 109, art. no.-B01402.
- MARTHALER, M. 2001. *Le Cervin est-il africain ?* Edition LEP SA. Lausanne, 96 pp.
- MUSSON, R., S. SELLAMI & W. BRÜSTLE 2009. Preparing a seismic hazard model for Switzerland: the view from Pegasos expert group 3(EG1c). *Swiss J. Geosc.* 102 (1): 107-120.
- RÉSONANCE ING.-CONSEILS SA GEOLOGIEBÜRO ROVINA & PARTNER AG & BUREAU D'ING. TISSIÈRES 2000. *Praxisbezogene seismische Mikrozonierung der Region Brig-Visp (Wallis)*. Unveröffentlichter Bericht für Staat Wallis, 65 p.
- ROTEN, D. & D. FÄH 2007. A combined inversion of Rayleigh wave dispersion and 2-D Resonance frequencies. *Geophys. J. Int.* 2007: 168, 1261-1275.
- VOLGER, G.H.O. 1857-1858. *Untersuchungen über das Phänomenon der Erdbeben in der Schweiz*. J. Perthes, Gotha (3 volumes).

- SELLAMI, S., P. ROTH, G. BIANCHETTI & J.D. ROUILLER 1997. Reservoir-Induced Seismicity in Val D'Illiez (Switzerland). IASPEI 29 General Assembly Thessaloniki (1997).
- WAGNER, J.-J., C. FRISCHKNECHT, P. ROSSET, M. SARTORI, C. SCHINDLER, D. MAYER-ROSA, E. RUETTENER & P. SMIT 2000. *Contribution au zonage sismique dans la vallée du Rhône, entre Sion et Brigue (Valais)*. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Service hydrologique et géologique national; Rapport géologique No 25, 123 p.
- WANNER, E. & M. GRÜTTER 1951. Etude sur les répliques du tremblement de terre du Valais, de 1946 à 1950. *Bull. Murith.* 67 : 23-42.
- WENK, T. & P. LESTUZZI 2003. *Erdbeben. Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Einwirkungen auf Tragwerke, Einführung in die Normen SIA 260 und 261*. Dokumentation D 0181, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

## LECTURES ET LIENS COMPLÉMENTAIRES:

- WEIDMANN M. & SED. 2002. Tremblements de terre en Suisse. Certina Verlag, Chur, 255 p.

<http://www.seismo.ethz.ch/>  
<http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01915/index.html?lang=fr>  
<http://www.cces.ethz.ch/projects/hazri/COGEAR>  
<http://www.crealp.ch>

## LEXIQUE

- Accéléromètre** : appareil qui mesure l'accélération du sol.
- Aléa sismique** : estimation du danger sismique.
- Catalogue** : base de donnée de tremblement de terre.
- Epicentre** : point à la surface de la terre, à la verticale de l'hypocentre.
- Hypocentre** : foyer du tremblement de terre en profondeur.
- Intensité** : estimation de la puissance d'un tremblement de terre à partir des observations des effets en un lieu donné. L'échelle de mesure de l'intensité utilisée en Europe est l'échelle EMS98.
- Magnitude** : mesure de l'énergie acoustique émise par le tremblement de terre.
- Risque sismique** : le risque sismique est fonction de trois facteurs: l'aléa sismique, la vulnérabilité et la valeur à laquelle s'élèveraient les dommages subis par les personnes et biens exposés.
- SED** : Schweizerische ErdbebenDienst (Service Sismologique Suisse)
- Séisme** : tremblement de terre, dans le texte on parle parfois d'événement (sismique).
- Sismomètre** : appareil d'enregistrement des mouvements du sol.